

第十二章

气体动理论



主要内容:

- 12-1 平衡态 理想气体物态方程 热力学第零定律**
- 12-2 物质的微观模型 统计规律性**
- 12-3 理想气体的压强公式**
- 12-4 理想气体分子的平均平动动能与温度的关系**
- 12-5 能量均分定理 理想气体内能**
- 12-6 麦克斯韦气体分子速率分布律**
- 12-7 玻耳兹曼能量分布律 等温气压公式**
- 12-8 气体分子平均碰撞次数和平均自由程**

热 学

研究对象：由大量微观粒子组成的宏观物体

研究内容：

热现象：与温度有关的物理性质、状态的变化.

宏观量：表示大量分子集体特征的物理量(可直接测量)，如 p ， V ， T 等.

热运动：大量微观粒子的无规则运动.

微观量：描述个别分子运动状态的物理量(不可直接测量)，如分子的 m ， \bar{v} ， ε 等.

研究方法：**热力学**：宏观理论，从现象中找规律.

统计物理学：微观理论，透过现象看本质.

统计物理的初级形式称为**气体动理论**。

§12-1 平衡态 理想气体物态方程 热力学第零定律

1. 气体的物态参量 (宏观量)

(1) 压强 p 单位: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

(2) 体积 V 单位: $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$

(3) 温度 T 单位: **K** (开尔文) $T (\text{K}) = 273.15 + t (^\circ\text{C})$

2. 平衡态

在不受外界影响的条件下, 系统的宏观性质不随时间变化的状态。

3. 理想气体的物态方程

平衡态时，理想气体宏观参量间的函数关系。

理想气体物态方程一

$$pV = \nu RT = \frac{m'}{M} RT$$

摩尔气体常量 $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

ν 物质的量 (mol)

m' 系统总质量, M 摩尔质量, m 单个分子质量

$$m' = Nm, \quad M = N_A m, \quad N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

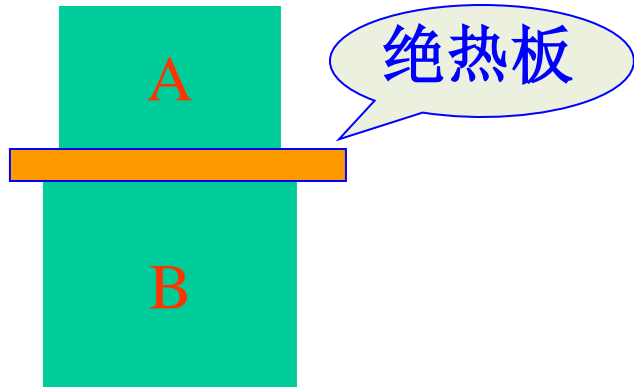
理想气体物态方程二

$$p = nkT$$

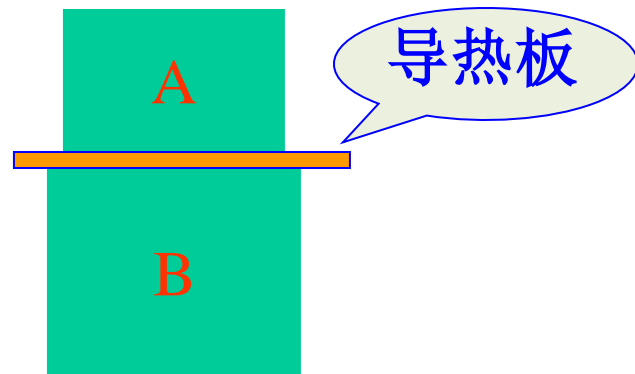
玻耳兹曼常量 $k = R / N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

$n = N/V$, 为气体分子数密度.

4. 热平衡



A、B 两体系互不影响
各自达到平衡态



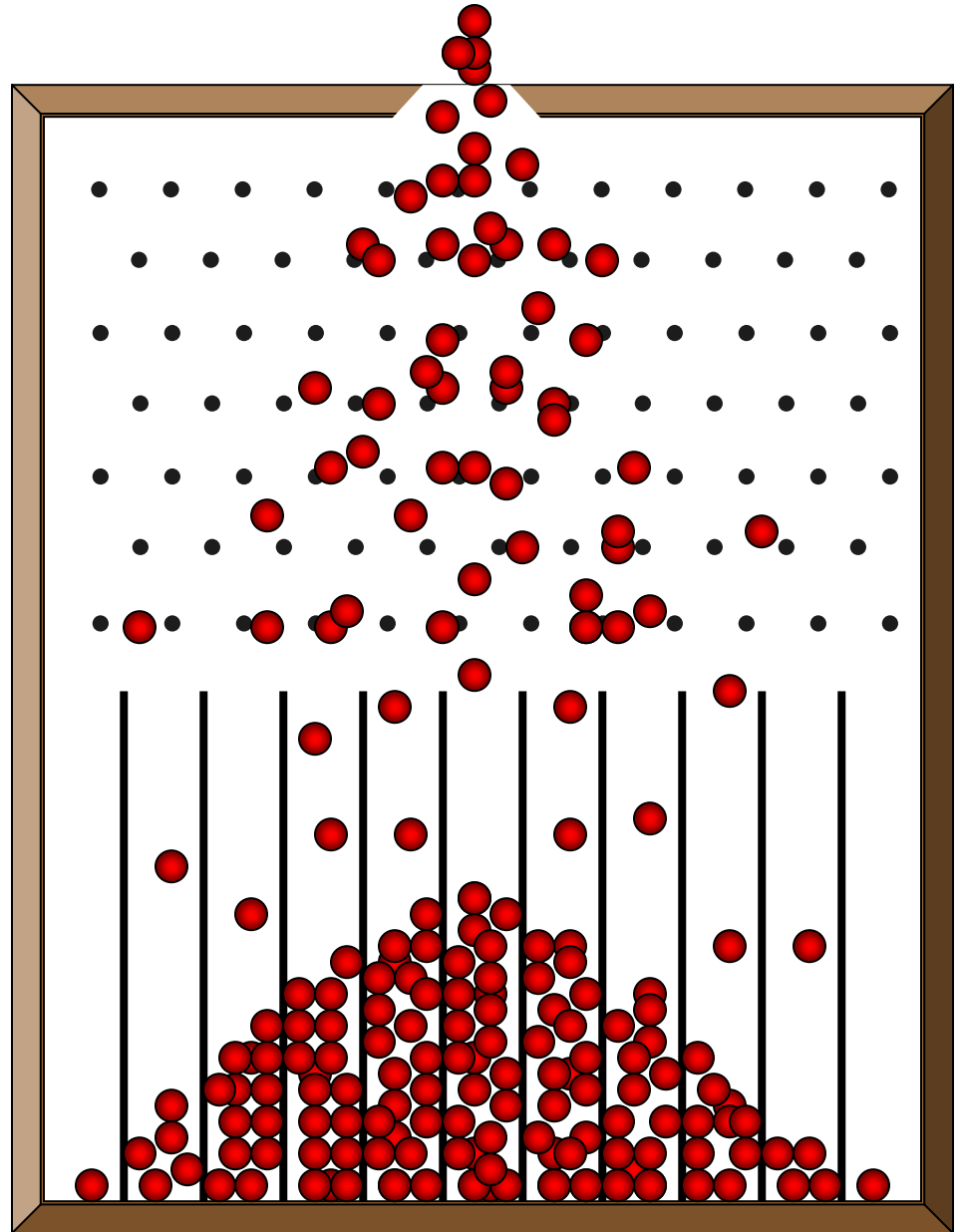
A、B 两体系达到**热平衡**状态，
A、B 两体系有共同的宏观性质，
称为系统的**温度**。

热力学第零定律

如果物体 A 和 B 分别与物体 C 处于热平衡的状态，那么 A 和 B 之间也处于热平衡。

§12-2 物质的微观模型 统计规律性

小球在伽尔顿板中的分布规律。



统计物理学的基本概念

(1) **概率** N_i — 事件 i 发生的次数

N — 各种事件发生的总次数

某一事件 i 发生的概率为 P_i

$$P_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N}$$

$$\sum P_i = 1$$

(2) **统计平均**

x	x_1	x_2	x_3	...
N	n_1	n_2	n_3	...

$$\overline{x(N)} = \frac{n_1 x_1 + n_2 x_2 + \cdots}{N} = \frac{1}{N} \sum_i n_i x_i$$

(3) **分布** $f(x)$

(4) **统计规律有以下几个特点:**

(1) 只对大量偶然的事件才有意义.

(2) 它是不同于个体规律的整体规律(量变到质变).

(3) 总是伴随着涨落.

§12-3 理想气体的压强公式



单个分子对容器壁的碰撞：偶然的、不连续的、不均匀的；

大量分子对容器壁碰撞的总效果：恒定的、持续的力的作用。

压强等于单位时间内容器壁上单位面积所受的平均冲量

一 理想气体的微观模型

- (1) 分子可视为质点；线度 $d \approx 10^{-10} \text{ m}$
间距 $r \approx 10^{-9} \text{ m}$, $d \ll r$ ；
- (2) 分子的运动遵从经典力学的规律；
- (3) 除碰撞瞬间，分子间无相互作用力；
- (4) 弹性质点（碰撞均为完全弹性碰撞）；
- (5) 重力忽略不计。

什么条件下，此模型与实际符合很好？

压强不太大，温度不太低

二 分子集体的统计性假设

(1) 分子运动速度各不相同，且通过碰撞不断改变；

平衡态下：

(2) 分子按位置的分布是均匀的 $n = \frac{dN}{dV} = \frac{N}{V}$ ；

(3) 分子速度按方向的分布是均匀的。

分子运动速度 $\vec{v}_i = v_{ix}\vec{i} + v_{iy}\vec{j} + v_{iz}\vec{k}$

各方向运动概率均等

$$\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z = 0$$

x方向速度平方的平均值 $\overline{v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_i v_{ix}^2 = \frac{1}{N} \sum_j n_j v_{jx}^2$

各方向运动概率均等

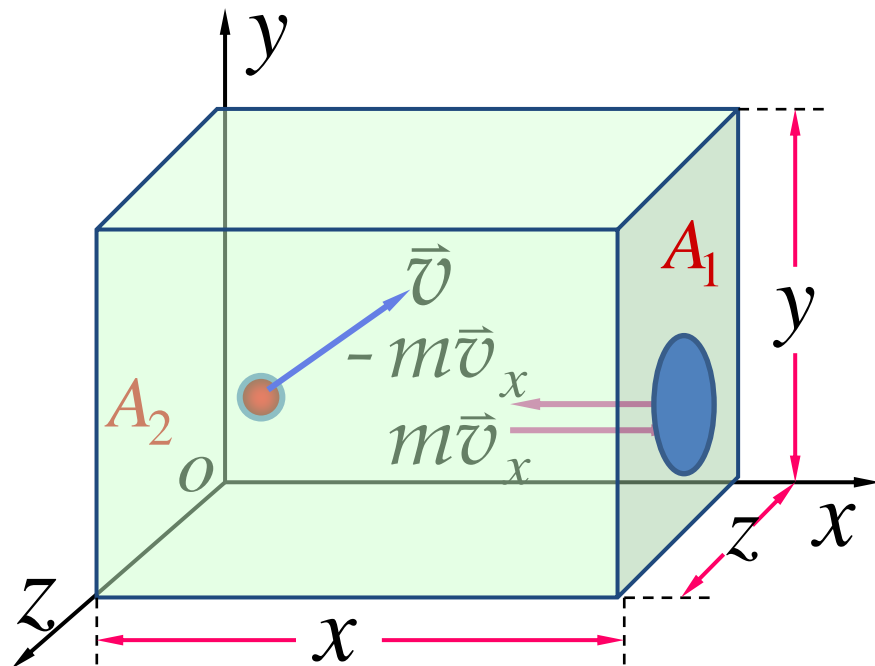
$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

三 理想气体的压强公式

1. 压强公式推导

$$N, V, m, n = N / V$$

每个分子速度的大小、方向各不相同，热平衡下，分子与每个壁都要碰撞，各个面所受的压强相等。



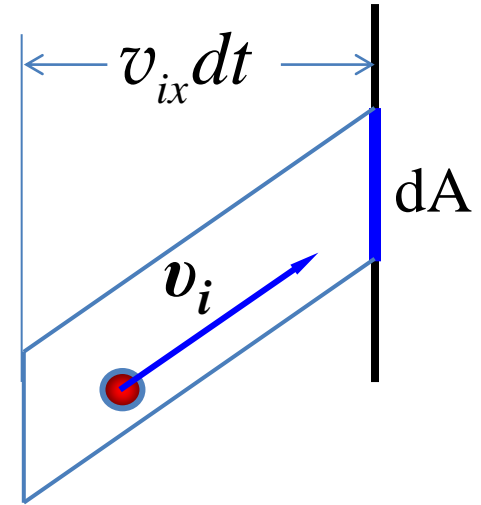
按速度分为若干组， 每组分子具有相同的速度 v_i ，分子个数为 N_i

在 A_1 上任取面元 dA ，计算 dA 上的压强

1) 速度为 v_i 的单个分子在一次碰撞中对器壁的作用

x 方向动量变化: $\Delta p_{ix} = -2mv_{ix}$

分子施于器壁的冲量: $2mv_{ix}$



2) dt 时间内第 i 组分子施于 dA 的冲量

在 dt 时间内, 所有速度为 v_i 的分子中, 有多少分子能够与 dA 碰撞

$$\frac{N_i}{V} v_{ix} dA dt$$

在 dt 时间内, 这些分子对 dA 的冲量为

$$2 \frac{N_i}{V} m v_{ix}^2 dA dt \quad v_{ix} > 0$$

3) 所有分子施于 dA 的冲量

在 dt 时间内，所有分子对 dA 的冲量为

$$dI = 2 \sum_{v_{ix} > 0} \frac{N_i}{V} m v_{ix}^2 dA dt = \sum_i \frac{N_i}{V} m v_{ix}^2 dA dt$$

4) 器壁所受的压强

$$p = \frac{F}{dA} = \frac{dI}{dA dt} = \sum_i \frac{N_i}{V} m v_{ix}^2 = \frac{N}{V} m \sum_i \frac{N_i v_{ix}^2}{N}$$

$$p = nm \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} nm \overline{v^2}$$

分子平均平动动能

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$$

气体压强公式

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k$$

若器壁不是平面的，公式是否成立？

理想气体压强公式适用于任何形状的容器.

2. 压强公式的物理意义

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k$$

宏观可测量量

微观量的统计平均值

(1) 压强是描述大量分子集体行为的平均效果的统计性量，对单个分子讲压强没有意义.

(2) 压强方程建立了宏观量和微观量的关系，说明分子密度越大，分子运动越剧烈，压强越大.

例1: 某器壁内分子数密度为 n ,每个分子的质量为 m ,设其中 $1/6$ 分子数以速率 v 垂直地向容器的一壁运动,器壁是弹性的。求每个分子的冲量,每秒碰在器壁单位面积的分子数和压强。

每个分子的冲量: $2mv$

每秒碰在单位面积的分子数: $\frac{nv}{6}$

压强: $\frac{1}{3}nmv^2$

2 理想气体体积为 V ，压强为 p ，温度为 T 。一个分子的质量为 m ， k 为玻耳兹曼常量， R 为摩尔气体常量，则该理想气体的分子数为：

(A) pV/m

(B) $pV/(kT)$

(C) $pV/(RT)$

(D) $pV/(mT)$

§12-4 理想气体分子的平均平动动能与温度的关系

理想气体压强公式

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k$$

理想气体物态方程

$$p = nkT$$

分子平均平动动能：

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

微观量的统计平均

宏观可测量量

温度 T 的物理意义

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

(1) 温度是统计平均值，是大量分子热运动的集体表现，谈论一个分子的温度没有意义。

(2) 在同一温度下各种气体分子平均平动动能均相等。

(3) 温度是物体内部分子无规则运动的剧烈程度的标志。

$$\bar{\varepsilon}_k \propto T$$

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

讨论

1 一瓶氦气和一瓶氮气密度相同，分子平均平动动能相同，而且都处于平衡状态，则：

- (A) 温度相同、压强相同.
- (B) 温度、压强都不同.
- (C) 温度相同，氦气压强大于氮气压强.
- (D) 温度相同，氦气压强小于氮气压强.

今日作业：12-1；12-6；12-8

12-1 处于平衡态的一瓶氦气和一瓶氮气的分子数密度相同，分子的平均平动动能相同，则它们（ ）

- (A) 温度、压强均不相同
- (B) 温度相同，但氦气压强大于氮气的压强
- (C) 温度、压强都相同
- (D) 温度相同，但氦气压强小于氮气的压强

12-6 一打足气的自行车内胎，在 $t_1 = 7.0\text{ }^\circ\text{C}$ 时，轮胎中空气的压强为 $p_1 = 4.0 \times 10^5\text{ Pa}$ ，则当温度变为 $t_2 = 37.0\text{ }^\circ\text{C}$ 时，轮胎内空气的压强 p_2 为多少？（设内胎容积不变）

12-8 氧气瓶的容积为 $3.2 \times 10^{-2}\text{ m}^3$ ，其中氧气的压强为 $1.3 \times 10^7\text{ Pa}$ ，氧气厂规定压强降到 $1.0 \times 10^6\text{ Pa}$ 时，就应重新充气，以免经常洗瓶。某小型吹玻璃车间，平均每天用去 0.40 m^3 压强为 $1.01 \times 10^5\text{ Pa}$ 的氧气，问一瓶氧气能用多少天？（设使用过程中温度不变）